

水工建筑物 下游消能问题

(1955年水工試驗研究會議学术討論文件选集)

水利出版社

本書彙集了水工專業會議的几个討論文件及技術結論，包括閘下消能初步綜合研究，輸水道出口的几种消能措施及灌溉渠道陡坡跌水下游消能防冲問題初步報告等文件。

水工建築物下游消能問題

編 者 中華人民共和國水利部教育司
出 版 者 水利出版社(北京和平門內北新華街 35 號)
北京市出版印刷業營業許可証出字第 080 號
排 版 者 京華印書局
印 刷 者 水利出版社印刷廠(北京西城成方街 13 號)
發 行 者 新 華 書 店

180 千字，插圖 2，787×1092 1/25 開，6 6/15 印張
1956 年 11 月第一版，北京第一次印刷，印數 1—6,500
統一書號: 15047.24 定價: (11) 1.10 元

前 言

为了适应水利建设的迫切要求和推进水工科学技术的发展，水利部于1955年11月在南京召开了水工试验研究会议。会议就目前水利建设中经常遇到的水工建筑物下游消能问题及其它有关水利科学技术问题进行了学术讨论，并对今后水工试验研究的题目与发展方向交换了意见。

参加会议的有水利部所属各试验研究单位，工程设计部门的试验研究人员与工程师，全国各有关高等学校的教授和中国科学院、交通部、水力发电建设总局、铁道部等部门的试验研究单位的代表共80多人。

这次会议学术讨论的中心问题是水工建筑物下游消能问题。每篇论文都在经过讨论、答辩后作了技术决议，对那些比较成熟的成果建议工程设计部门参考应用。对不够成熟的地方指出了继续研究的步骤和方向。主要的有以下三篇：

“闸下消能初步综合研究”是水利部南京水利实验处总结了解放以来42项水闸模型试验的成果，通过了综合的研究与系统的分析，找出了一些可供工程设计部门直接引用与参考的结论。

“输水道出口的几种消能措施”是水利部南京水利实验处综合了佛子岭水库、大伙房水库等8个水库输水洞的模型试验成果，分成四种不同的消能工进行了分析，对水工设计有指导性的意义。

“灌溉渠道陡坡跌水下游消能防冲问题初步报告”是水利部西北水工试验所总结了以往试验成果和调查了泾惠、渭惠等12个灌区渠道上的陡坡跌水下游冲刷情况，并进行了分析与补充试验的成果，可作为设计的参考。

现在将以上三篇报告及会议对各篇报告的技术决议编印成册（并

附“潤河集進湖閘靜水池損壞原因的分析和修復意見”一文),以作進一步研究和設計工作的參考。但這些報告大部分只是試驗資料的分析和整理,研究工作僅剛開始,難免有錯誤和缺點,希望讀者給予批評和指正。

目 錄

前言

一、閘下消能初步綜合研究	(1)
(一)引言	(1)
(二)資料來源的說明	(1)
(三)閘下消能的特点与其主要消能部分	(5)
(四)靜水池与水躍的形成	(6)
(五)出流平台上的消能設備	(16)
(六)海漫的長度与布置	(26)
(七)翼牆扩张的角度与形式	(34)
(八)結語	(43)
参考文献	(44)
“閘下消能初步綜合研究”技术決議	(48)
二、輸水道出口的几种消能措施	(51)
(一)引言	(51)
(二)扩散器噴射消能	(53)
(三)平台扩散水躍消能	(58)
(四)管流突然扩散消能	(71)
(五)明塘綜合扩散消能	(83)
(六)結語	(92)
参考文献	(94)
“輸水道出口的几种消能措施”技术決議	(96)
三、灌溉渠道陡坡跌水下游消能防冲問題初步报告	(97)
(一)引言	(97)
(二)陡坡跌水下游产生冲刷的原因和消能工的特点	(98)
(三)陡坡跌水下游短形消力塘消能比較試驗	(105)
(四)陡坡跌水下游消力塘中輔助消能工的介紹	(122)

(甲)帶菱形陡槽的梯形陡坡跌水消力塘中補助消能工的補充試驗結果	(122)
(乙)矩形消力塘中的補助消能工措施	(119)
(五)初步總結和建議以及試驗研究工作中存在的問題	(139)
(甲)對陡坡跌水下消能防沖問題的初步總結和建議	(139)
(乙)試驗研究工作中存在的問題	(142)
參考文獻	(143)
“灌溉渠道陡坡跌水下消能防沖問題初步報告”技術決議	(144)

一、閘下消能初步綜合研究

(一) 引言

各种形式的水閘在水利建設事業中适用的范围最为广泛，因此在数量上也最多，其对国民經济的影响至巨；在南京水利实验处接受的委托試驗項目中，閘的試驗也占大多数。故对于已有的水閘試驗資料的綜合整理分析，探求一般的規律，作为設計的参考，并借以减少委托試驗的数量，以适应目前广大的水利建設事業的需要，成为迫不及待的当前急务；为此本处已將其列入較長期的研究計劃中。今年全国水利科学試驗研究會議确定在南京召开水工試驗專業會議，規定了中心討論題目“水工建筑物下游消能与防冲問題”，也說明問題本身的重要性。本文只是为了迎接專業會議而进行輪廓的初步資料整理，作为問題研究的开端。

参加綜合整理分析工作的，为毛昶熙、楊孟藩、周名德等同志。由毛昶熙同志編写报告。

(二) 資料來源的說明

本文主要資料的来源，为解放以来本处所进行的水閘模型試驗結果。計包括 31 項工程，42 項模型試驗，其中整体模型試驗 22 个，半整体模型 8 个，断面模型試驗 12 个。并依其試驗的先后編号列为第一表。

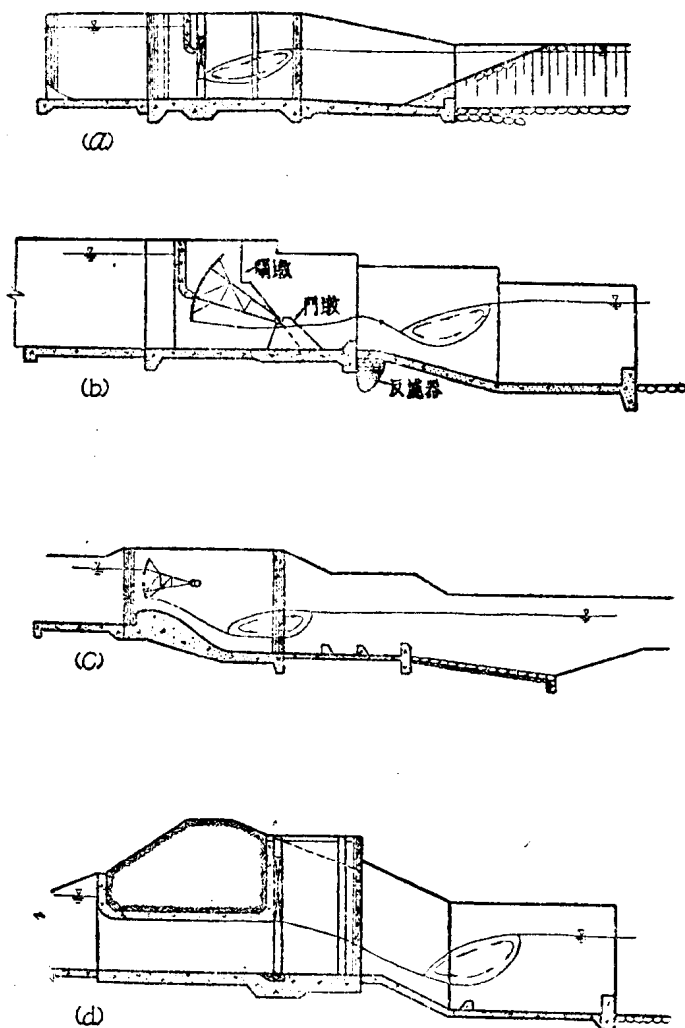
整理工作开始时，先將各閘試驗接近于最优形式的修正終結布置繪出結構輪廓的标准圖，表明水流边界条件的各部結構尺寸及水位流量等影响消能的主要控制水力因素，以便于資料的綜合分析。

第一表

試驗原名編號及模型布置情况表

編號	名	模 型 布 置 情 况
1	淮河潤河集分水閘	閘閘閘及固定河槽 1:100 整体模型, 進湖閘 1:90 断面模型, 閘閘閘 1:25 断面模型, 固定河槽 1:50 断面模型
2	長江鳳凰頭閘	1:25 半整体模型
3	苏北皂河节制閘	1:50 整体模型
4	苏北运河分水閘	1:25.5 断面模型
5	苏北駱馬湖進水閘	1:50 半整体模型
6	苏北高良閘進水閘	1:50 整体模型
7	淮河东汜河進水閘	1:50 半整体模型
8	淮河濉河窪地進水閘	1:70 整体模型及 1:20 断面模型
9	淮河濉河窪地退水閘	1:25 半整体模型
10	苏北三河閘	1:37.5 断面模型
11	長江白茆閘	1:25 整体模型
12	苏北刘老閘节制閘	1:40 整体模型
13	淮河霍邱城东閘閘	1:32 断面模型
14	山东新流河节制閘	1:50 整体模型
15	山东龍門水庫進水閘	1:10 半整体模型
16	淮河上游老王坡刘店寨閘	1:40 整体模型
17	淮河方集閘	1:40 整体及 1:25 半整体模型, 弧形及屋頂閘門两种設計方案
18	河北青甸窪邵庄子閘	1:40 整体模型
19	淮河淮源引河閘	3孔及4孔閘設計方案 1:32 整体模型, 5孔閘設計方案 1:40 整体模型
20	長江小孤山分洪閘	1:20 及 1:40.9 断面模型
21	長江詹家壩閘	1:50 整体模型, 3种設計方案
22	長江張渡湖閘	1:40 整体模型
23	山东江風口閘	1:70 整体模型及 1:23.34 断面模型
24	淮河上游沙河退水閘	1:60 整体模型
25	淮河上游沙河進水閘	1:70 整体模型
26	苏北高良閘進水閘加固工程	1:50 整体模型
27	長江楊灣閘	1:40 半整体模型
28	淮河潤河集分水閘修复工程	1:100 整体模型及進湖閘 1:40 断面模型
29	山东华沂节制閘	1:50 半整体模型
30	苏北三倉河閘	1:70 整体模型
31	苏北射陽河閘	1:35 断面模型

曾經試驗的 31 个閘的結構型式,大部为平底閘,少数为加一小壩的溢流堰式閘,个别为箱式涵閘。閘底板上的閘墩、桥墩及門墩的配合,有閘墩而兼作桥墩与門軸支撐者,有閘墩、門墩分設而兼作桥墩者,个别也有閘墩、門墩、桥墩三者分設者。閘門的型式有直升式平板閘



第一圖 試驗各閘的类型

門與弧形閘門，個別也有用平板式轉動閘門或平臥式的閘門；門頂有附設胸牆者，也有不設胸牆者。至于消能設備，如消力檻、靜水池或斜坡護坦以及翼牆的型式等，則更為複雜。綜合試驗各閘的結構型式，主要可以第一圖 (a)、(b)、(c)、(d) 的類型，彼此置換局部結構代表之。

关于各閘的水力因素，則因其工作条件及地区的不同，水位流量变化很大。例如一般的分洪閘，開閘時下游常有無水現象(下游水位極低的代稱，下同)，致引起严重的冲刷；退水閘或排水閘的尾水位变化范围極大，致尾水河床常需开挖为复式渠道断面，促使消能的复杂性；又如流域及地区的特性，水头差或單位寬流量也有很大的差別。綜合各閘消能水力条件的范围如第二表：

第二表

各閘消能試驗的主要控制水力条件

过閘最大流量 Q (秒公方)	單寬流量 q 秒公方/公尺	最大水头差 ΔH (公尺)	下游河床水深 (公尺)	出流最大流速 (秒公尺)
40~5,700	8~42	2~7	1~14.5	5~13

此外尚有一部分資料是專为配合本文資料整理工作所进行的重点补充試驗成果，一方面輔助分析資料，补充各委托試驗的不足，一方面可作为資料分析結果的驗證。此項补充試驗对象为一般平底閘結構，主要就靜水池、斜坡護坦、消力檻及翼牆的擴張角度等消能設備进行重点觀測。至于有系統有步驟的消能扩散及下游冲刷試驗研究，則拟另訂計劃进行。

如上所述，可知資料来源不論在結構的边界条件方面或其水力控制条件方面，均有很大的不同与变化。而且各个工程試驗要求亦有区别，多数工程由于施工緊張，限制試驗中的修改。再加以各人主持試驗所掌握的标准在程度上也不完全相同。因此本文所引用的修正終結消能形式的各項資料，實質上仅是接近于最优形式，而对于最优形式的距离尚包括一定范围，在整理分析資料的过程中造成了很多的困难，也限制了綜合整理所得成果的質量。

(三) 閘下消能的特点与其主要消能部分

閘下消能的特点,可归納下列三点:

1. 一般閘的尾水位較高,且变差很大,由最低枯水位升至接近于上游水位;出閘水流最主要的受尾水的影响,而由射流到淹没度很大的潜流都有發生。較之一般壩頂溢流或水庫輸水道出流等經常为射流的情形,增加了緩流及接近临界流的波狀水流消能的困难。

2. 过閘水流,由孔流而堰流,出流形式以及出流厚度不断随水位升降或閘門的控制而改变,致与下游水体間的水流衔接形式变化范围也大。較之固定出口形式的出流,則更增加了消能设备的复杂性。

3. 一般閘多建在平原地区的土質河床上,因此河床岸坡平緩,甚至在較高水位变化时,需要开挖复式断面渠道,以适应岸坡的稳定,致水面寬度远远超过渠底寬度,造成扩散段形式極难适应高水位时水面急剧扩张的要求。且河床土質抗冲能力常低,無論在流速大小或流速分布上均匀方面的要求,也都較山区水工建筑物的石質岸床更为严格。

由于閘下消能的特点,就决定了消能工的目的,一方面須促成水躍挫杀射流;一方面須消除波狀水流及緩流的集中流势,使尽早达到平面的横向扩散;并須密切注意閘下河床冲刷的防护。因此閘下消能的主要部分有:

1. 以促成水躍消能为主的靜水池及其輔助消能工;
2. 池前出流处的檻齿等消能工,主要用以适应不产生水躍时的波狀水流,使出流分散,进一步的發揮靜水池的作用;
3. 池后的海漫,繼續消除出池水流的余能,使水躍尾端的紊动現象不致对下游河床發生显著冲刷;
4. 另外直接影响此三种消能部分的效果,并同样地有决定性作用者,为促使横向均匀扩散消能的翼牆形式及扩张角度。

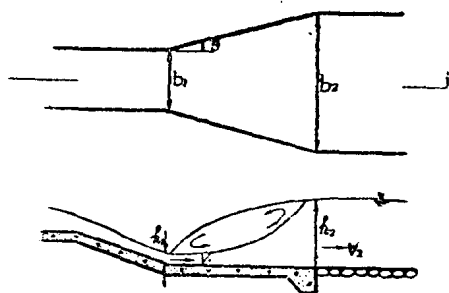
今將上述四方面消能设备的主要功用和綜合整理所得成果分节介紹如下。本初稿因限于時間,暫未能將閘門控制管理、陡坡扩散水躍、消能与冲刷的关系等三部分包入。

(四) 靜水池与水躍的形成

靜水池的主要作用为增加尾水深度，使能满足水躍第二共轭水深的要求，利用水躍消弋出閘射流的大量能量。根据已有二元水流的水躍試驗，随佛勞德(Froude)氏数的增大，水躍可消失全部能量达46~67%，比不产生水躍的渐变流动所消失的能量要大几十倍⁽¹⁾。因此，靜水池已为閘下消能的主要部分。今就扩散水躍的形成、池長、尾檻作用及形式、輔助消能工等四部分分节簡述于下：

[甲] 池深与平底扩散水躍的共轭水深

最經濟的池深設計，为恰使最低尾水位时的水躍开始在靜水池斜坡坡脚处。二元水流的水躍共轭水深的計算，已有明确的公式，但对于三元扩散水躍，尚無一比較理想的公式可資利用。主要的關鍵問題，則



第二圖

为側壁作用力的处理問題。例如阿格罗斯金氏⁽²⁾假定扩散側壁的水压力为相当于尾水共轭水深处 h_2 的靜水压力，次沃特可夫氏⁽³⁾假定側壁受水压力的条件为水躍水面兩側成1:3的坡面，契尔陀烏索夫氏⁽⁴⁾假定側壁受水压力的条件为水躍面兩側成1/4次方的拋物綫，沙馬

林氏⁽⁵⁾則引証时根本路去了側壁压力的作用等。由于假定不同，因此各人所得的公式也就不同了。

假定第二圖中扩散槽兩端的1—1与2—2两个断面代表水躍前后的两个断面，就可假定躍前的水流与躍后的水流方向相同。同时不考虑側牆的作用力，就可引用沙馬林理論得下列的結果：

$$\frac{\alpha_1 q_1^2}{gh_1} + \frac{h_1^2}{2} = \left(\frac{\alpha_2 q_2^2}{gh_2} + \frac{h_2^2}{2} \right) b_2 \dots \dots \dots (1)$$

將(1)式兩端均除以 h_1^3 , 可得

$$\frac{\alpha_1 q_1^3}{gh_1^3} + \frac{1}{2} = \left(\frac{\alpha_1 q_2^3}{gh_2^3} + \frac{h_2^3}{2h_1^3} \right) \frac{b_2}{b_1} \dots\dots\dots(2)$$

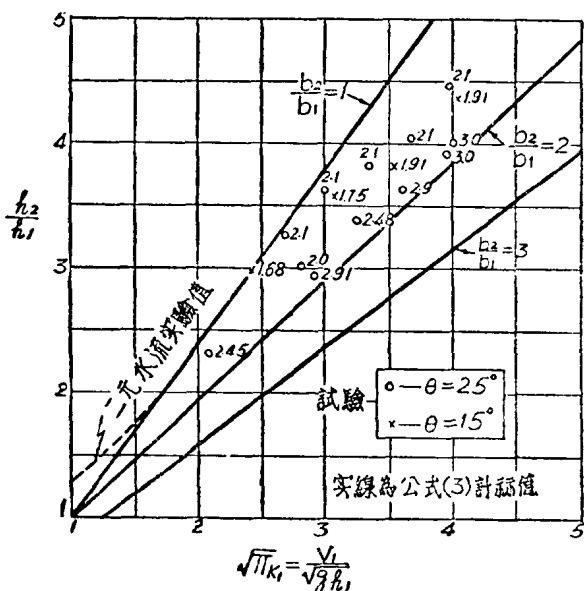
暫設 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, 运动参变数 $\Pi k_1 = \frac{v_1^3}{gh_1} = \frac{q_1^3}{h_1^2(g h_1)}$, 且 $q_2 = q_1 \frac{b_1}{b_2}$

故得
$$\Pi k_1 + \frac{1}{2} = \Pi k_1 \cdot \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{b_1}{b_2} + \frac{1}{2} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 \cdot \frac{b_2}{b_1} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{h_2}{h_1} = f \left(\Pi k_1, \frac{b_2}{b_1} \right) \dots\dots\dots(4)$$

根据消能补充試驗, 重点地对上式加以验证, 結果如第三圖所示, 所需躍后共轭水深均較公式(3)計算值为大。这种差別产生的原因, 是由于理論的公式忽視了槽側作用力的影响, 同时因为我們的水躍是在放射式的扩散水槽的扩散段中部發生的, 躍前与躍后两个断面上各点的水流方向并非相同, 但是在沙馬林的理论中, 这些水流方向是假定相同的, 因此他的理論公式不能完全适合我們的实际情况。

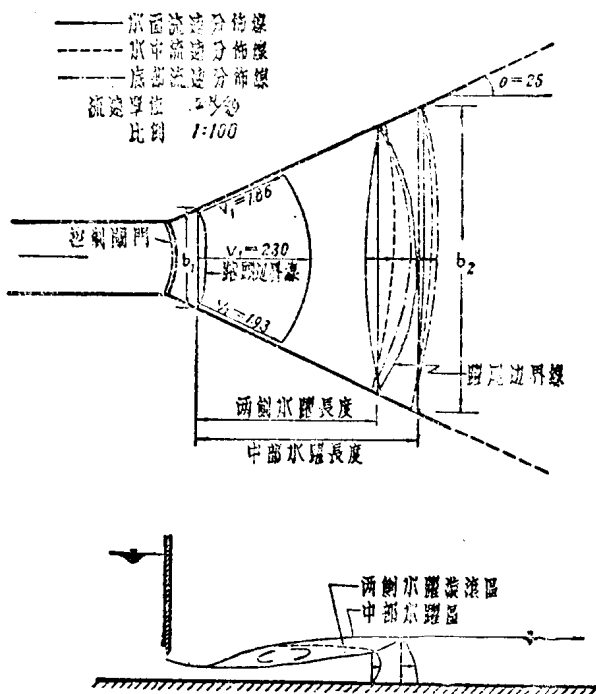
补充試驗中, 由于企圖达到最大扩张角度, 以与各閘試驗翼牆扩张近似, 故采用在平面圖上为圓弧形閘門控制出流, 但是經測驗其流速分布仍甚不平均, 且水躍的長度, 中部較長于側边, 則与确定 b_2 值有关的躍尾



第三圖 扩散水躍共轭水深的关系

位置也發生困难, 因此試驗結果与理論值相差較多。而且扩张角度愈

大,其擴張不均勻的程度也大,在第三圖中顯示離開理論的實綫愈遠。可見擴散槽中水躍的理論尚須進一步研究。但是試驗証明,擴散水躍所需要的尾水共軛水深較矩形二元水流者為小,則可肯定,一般的擴散水躍情形下,依照二元水躍理論進行計算時,偏于安全的一側。



第四圖 擴散水躍的水流情形

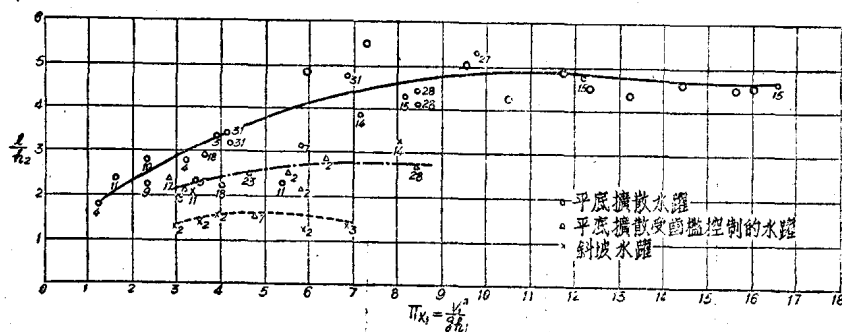
各閘試驗中,由于出流平台上加設各種檻齒,使水流擴散的角度很大,而且隨其擴散良好與否所需的尾水深也異,但缺少靜水池平底上產生水躍的資料,故未列入互相比較。

至于設計靜水池深度所需的躍前水深 h_1 , 則與消能的情況等有密切關係,將結合陡坡擴散水躍一併研究。受尾檻高度影響的共軛水深關係,則列入本節[丙]中。

[乙] 池長与水躍的長度

靜水池的長度可由水躍的長度確定，但水躍的長度函数关系和算法有不同形式的公式。即以二元水流問題的水躍長，有写作躍后尾水深度 h_2 的函数，有写作躍前水深 h_1 的函数，有写作躍高 $(h_2 - h_1)$ 的函数，以及再加上佛勞德氏数或运动参数 Π_{K_1} 的因素，或綜合包括上述几个因素者⁽⁵⁾。而且各家公式的計算結果相差很大，或随所包括因素的变化有相反的趋势⁽⁶⁾。此种原因可能系在試驗中測定躍長的標準不同所致。根据水躍方程式的来源，正确的水躍尾应在漩滾后的緩流区，且該处断面上的流速分布須相当均匀。可是由于試驗中的判別方便，則多以漩滾末端为限，也有以躍后水面升至高处为躍尾标准者⁽⁷⁾。因此所得的經驗公式也有区别。

至于帶有兩側扩散的水躍長度，則研究者尚少，而对于实际工程靜水池長度的設計却有重要的实际意义，根据各閘試驗測定的水躍漩滾長度的关系，如第五圖所示。圖中各点的注字为閘的編号，未注数字的較大点子为消能补充重点試驗的資料。

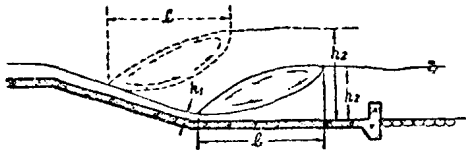


第五圖 閘下扩散水躍的長度

由第五圖曲綫可知，在靜水池平底上或坡脚处产生水躍，如第六圖中实綫水躍所示，其水躍相对長度最大，随运动参数之增加可写为：

$$\left. \begin{aligned} 3 < \Pi_{K_1} < 6 \text{ 时, } l &= (1 + 0.6 \Pi_{K_1}) h_2 \\ 6 < \Pi_{K_1} < 17 \text{ 时, } l &= 4.6 h_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

水躍全部或絕大部分瀉滾在陡坡上的水躍，如第六圖中的虛綫所示，其躍長的相對值虽小，而



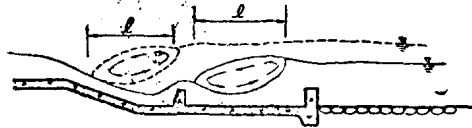
第六圖

由于尾水深度 h_2 較大，其躍長的絕對值反較平底水躍者稍長。但水躍推向前面的陡坡段，躍尾仍較平底上水躍的末端前移，故靜水池的平底

長度仍受較低尾水位時平底水躍長度的控制。

若池中加設小檻或齒，如第七圖中所示，則對躍長有顯著減短，在第五圖中指示約減短 $1/3$ 。

以上結果僅適宜於較小的運動參變數 $II\pi_1 < 17$ ，再大時可能縮短⁽³⁾。



第七圖

水躍長度的統計資料，系指受靜水池尾檻影響的瀉滾長度，故正確的躍長應較此稍長。今若將控制靜水池長度的平底水躍長度，或產生在坡腳處的水躍，而仍從平底開始處算其躍長的結果，與所採用適合的靜水池平底長度相較，可列如第三表：

第三表

靜水池長度與水躍長度的關係

圖 編 號	靜水池平底長度與水躍長度之比	池底較水躍長度長出的水深倍數
4	1.2	0.3
5	1	0
7	1	0.2
10	1.4	0.8
11	1.1	0.4
13	1.2	0.8
15	1.3	1
18	1.4	1
20	1.4	1
23	1	0
24	1.5	1.6
27	1	0
28	1	0
31	1.3	0.7

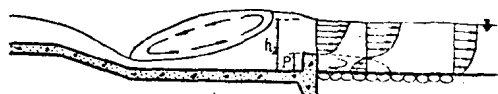
由上表所示,考虑水躍長度所决定的靜水池長度多較躍長稍長,表中所量得的躍長,因受尾檻的影响,已較一般所指躍長縮短,亦有关系。根据本文分析的水躍長度确定靜水池时,仍应結合出池流速的条件加長0~1 倍的池中水深。另外尚有未列入表中的各閘,考虑到扩散作用,或躍尾流速尚大,采用了更長的靜水池,而未完全依照水躍長度作为确定靜水池的試驗标准。

〔丙〕 靜水池尾檻的作用及形式

水躍末端的水流,底部流速大于水面流速,与一般河渠的正常流速分布不同。因此在靜水池或护坦末端宜加消力檻,与下游的海漫或河床分开。如第八圖所示。此項尾檻的作用有四:

1. 截住水躍并縮短水躍長度;因而可以縮短混凝土工程長度;
2. 抬高池中水位,增加共軛水深,因而具有减小池深之效;
3. 將水流挑向水面,减小底部流速,并可在檻后形成渦流⁽⁹⁾,免除檻脚下的淘刷⁽¹⁰⁾;
4. 助長扩散作用,有削減下游側边迴溜之功,使尽早恢复河道的

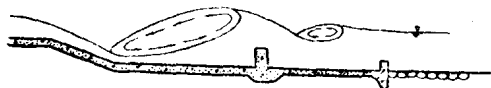
正常流速分布,以节省海漫的長度。



第八圖

尾檻的高度对上述的作用有密切关系,尾檻过

低固然沒有显著的作用,尾檻过高則又容易造成其他不良現象,例如产生显著的二次跌差或二次水躍,因此仍須加强檻后护坦,抵抗跌流,并再加設第二道檻,如第九圖所示。显著的二次跌差和二次水躍,一般应予避免;仅当工地因条件限制,不允許降低靜水池底,或工程施工緊張,無暇进行修改設計时,始放弃



第九圖

一次消能布置,而采用第二道檻的布置⁽¹¹⁾,以承受出池水流的余能,或求再一次的扩散。又尾檻过高时,如將水流挑向水面太甚,則易引起水面較大的波动,对岸坡不利,或影响下游行船。